



# Spin and charge transport properties in magnetic materials with lowered symmetry

著者	Chen Yao
number	92
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	理博第3326号
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/00131725">http://hdl.handle.net/10097/00131725</a>

# 論文内容要旨

(NO. 1)

氏 名	CHEN, Yao	提出年	令和 2 年
学位論文の 題 目	Spin and charge transport properties in magnetic materials with lowered symmetry (低対称性の磁性体中のスピン・電荷輸送特性)		

## 論文目次

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1.1	Spin current .....	2
1.1.1	Electron spin currents and magnon spin currents .....	2
1.1.2	Spin Hall effect and inverse spin Hall effect .....	3
1.1.3	Spin-Seebeck effect .....	5
1.2	Spin and charge in one-dimensional solid state materials .....	11
1.2.1	One-dimensional fermion system .....	11
1.2.2	One-dimensional spin-1/2 system .....	14
1.2.3	One-dimensional spin-1/2 system with frustration and dimerization .....	16
1.3	Soliton excitation in one-dimensional spin chain: spinon and triplon .....	17
1.3.1	Ground state and the soliton excitation in the Heisenberg- $\delta$ - $\alpha$ model .....	17
<b>2</b>	<b>Experimental details</b>	<b>27</b>
2.1	Sample fabrication and evaluation methods .....	27
2.1.1	Fabrication of $\text{CuGeO}_3$ single crystal .....	27
2.1.2	Magnetron sputtering .....	31
2.1.3	Electron beam lithography .....	33
2.2	Measurement methods .....	34
<b>3</b>	<b>Triplon spin current in <math>\text{CuGeO}_3</math></b>	<b>39</b>
3.1	Introduction .....	39
3.1.1	Spin-Peierls transition .....	39
3.1.2	$\text{CuGeO}_3$ .....	40
3.2	Properties of the $\text{CuGeO}_3/\text{Pt}$ sample .....	45
3.3	SSE in $\text{CuGeO}_3/\text{Pt}$ sample .....	49
3.4	SSE in $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{Pt}$ and $\text{Cu}_{1-x}\text{Zn}_x\text{GeO}_3/\text{Pt}$ samples .....	55

3.5 Boltzmann approach to the triplon SSE .....	59
3.6 Interfacial SSE approach to the triplon SSE .....	65
3.7 Discussion and conclusion .....	70
<b>4 Transport properties of superconducting vortices in 1D magnetic domain structures</b>	<b>71</b>
4.1 Introduction .....	71
4.1.1 Ginzburg-Landau theory of superconductivity .....	71
4.1.2 Superconducting vortex .....	74
4.1.3 Concept of the study .....	79
4.2 Sample characterization .....	81
4.2.1 Superconducting properties .....	81
4.2.2 Magnetization of the $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ film .....	84
4.3 Anisotropic transportation of superconducting vortices .....	84
4.4 Discussion and Conclusion .....	93
<b>5 Conclusion</b>	<b>95</b>
<b>6 Appendix</b>	<b>97</b>
6.1 Relevant, irrelevant and marginal terms in the Heisenberg- $\delta$ - $\alpha$ model .....	97
6.2 Excitation gap of one-dimensional spin chain .....	98
6.3 Soliton and anti-soliton solution of the Sine-Gordon equation .....	99
<b>7 Acknowledgements</b>	<b>102</b>
<b>Publication list</b>	<b>104</b>
<b>Bibliography</b>	<b>105</b>

In many 1-D quantum materials, the magnetic order disappears due to the geometrical frustration and quantum distortion of its low dimensionality. In such systems, the ground state elementary excitations cannot be formulated by non-local and non-linear transformations of the spin operators. The elementary excitations are known as spin-1/2 spinon for Tomonaga-Luttinger spin liquid and spin-1 triplon for spin dimer system. These excitations are investigated in the context of the quantum spin community but are still a new field in spintronics. As a central concept of spintronics, the spin current is the flow of pure spin angular momentum. The conducting electron spin current and magnon spin current are two of the most famous and most investigated spin current in the field of spintronics, but generally, a quasiparticle with non-zero spin can also be a spin current carrier. Recently, a new spinon spin current in a quantum spin liquid has been discovered. This discovery extends the concept of spin current to quantum spin systems and encourages us to pursue the spin current carried by triplon excitations. The aim of the first part of this dissertation is to investigate the transport phenomena of spin excitation in low-symmetry magnetic structures: the spin-Peierls system.

The first part consists of three chapters: chapter 1-3. In chapter 1, we show basic concepts of spin current and other spin current related phenomena such as the spin-Seebeck effect and the inverse spin Hall effect. In this chapter, the basic physics of one-dimensional spin systems (Tomonaga-Luttinger spin liquid and spin dimer system) are also introduced.

In chapter 2, we describe the sample fabrication, evaluation, and measurement details.

In chapter 3, the observation of triplon spin current in a spin-Peierls material  $\text{CuGeO}_3$  is discussed.  $\text{CuGeO}_3$  was the first inorganic material to show a spin-Peierls transition and was often used to study the spin excitations in spin-Peierls systems since it is possible to obtain larger single crystals than organic ones. The spin-Seebeck effect was measured by applying a magnetic field in the platinum film and a temperature gradient on the c-axis parallel to the one-dimensional spin chain after the film was deposited. As a result, a spin-Seebeck signal in  $\text{CuGeO}_3/\text{Pt}$  was observed only in the spin-Peierls phase. In addition, the sign of the signal is opposite to that of conventional ferro-/ferri- magnets. This difference in signatures is consistent with the fact that the spin polarization direction of the triplon is opposite to that of the magnon. We have also constructed a theory for triplon using the Boltzmann equation of relaxation time approximation. By taking into account the impurity scattering of the triplon, the theoretical calculations qualitatively reproduce the signal observed in the experiment.

The second part (chapter 4) is the search for the transport phenomena of superconducting vortices in a one-dimensional magnetic domain. Superconducting vortices are topological excitation in second type superconductors and are topologically protected and therefore not dissipated in the sample. A vortex has a normal core, and the superconducting order parameter are suppressed in a length scale of  $\xi$  around the core. It also consists magnetic flux, with a penetration length of  $\lambda$ . The application of spintronics using vortices, which also carry angular momentum, has recently been reported. For example, long-range spin current transport was investigated using vortex flow. Vortex is a magnetic object, making it a microscopic probe for local magnetic fields. The velocity of vortex is proportional to electric resistance of superconductor and we can use it as an index of the mobility of vortex. To regulate the flow of the vortices, the transport of the vortices in one-dimensional magnetic domains was investigated in this dissertation.

## 論文審査の結果の要旨

磁性体と電気伝導体の接合では新奇なスピン・電荷複合輸送特性が出現し、スピントロニクス重要な舞台となっている。近年、結晶やナノ構造の対称性を低下させた物質から構成される接合の作成が可能になったが、その物性はまったく未解明であった。Yao Chen 氏提出の論文は、ダイマー絶縁体  $\text{CuGeO}_3$  と金属 Pt の接合系、および複雑な磁区構造を有する磁性絶縁体 YIG と超伝導体 NbN 接合系に注目し、磁性と強く結合した電子物性を開拓した。

一次元スピン鎖においては、パイエルス不安定性により格子が歪み、スピンの 1 重項のダイマー状態が生成される。これはスピンパイエルス相と呼ばれ、無機物では絶縁体酸化物  $\text{CuGeO}_3$  において初めて確認された。スピンパイエルス相のスピン素励起は、トリプロンと呼ばれるスピン 3 重項励起である。トリプロンはスピン角運動量を運ぶためスピントロニクス機能の発現が期待されているが、その輸送特性は全く知られていなかった。本論文では、 $\text{CuGeO}_3$  と Pt の接合に温度勾配を印加し、熱流が運ぶトリプロン流を調べた。トリプロン流が生成され接合に到達すると、Pt 中にスピン角運動量が注入され、逆スピンホール電圧を生じることでトリプロン流を検出可能である。この点に着目し、温度勾配が誘起する Pt 中の起電力の磁場および温度依存性を系統的に調べた。その結果、低温度において従来のスピン波型温度勾配誘起逆スピンホール電圧（スピン波スピンゼーベック効果）とは逆の符号をもつ熱起電力を発見し、試料依存性の系統的なデータと理論計算を比較することで、観測された電圧がトリプロン流によるものであると結論した。また、トリプロン流は極低温度で顕在化し、少量の不純物ドーピングにより急速に抑制されることを見出した。トリプロンは、ダイマー磁性体の殆どに共通して現れる普遍的な励起である。本研究は、トリプロン流の初めての観測、およびトリプロン輸送物性の初めての研究例である。

磁場下に置かれた第二種超伝導体の超伝導転位温度近傍では、磁気渦の液体状態が形成され、電荷輸送特性は磁気渦のダイナミクスによって支配される。一方、磁性体薄膜の残留磁化状態では、複雑な磁区パターンが現れることがあり、このような磁区パターンをスピントロニクス情報担体として利用することが検討されている。本論文では、磁性体 YIG 薄膜中の磁区パターンが、YIG 薄膜上の超伝導 NbN に量子化された異方的磁気抵抗効果を産み出すことを見出した。これは、磁区パターンの作るポテンシャルに沿って磁気渦が動くことを反映しており、電気輸送物性から磁区パターン情報を読み取ることが可能になった。

Yao Chen 氏提出の論文は、トリプロン流による熱流誘起逆スピンホール電圧を発見し、トリプロン輸送物性分野の端緒をひらいた。また、磁性体の磁区パターンに強く依存した異方的超伝導磁気渦がもたらす磁気抵抗効果を初めて見出した。これは、スピントロニクスがトリプロンや磁気渦へ拡張された新しい学問分野を切り拓くものであり、学問的に高く評価される。以上の内容は、提出者の Yao Chen 氏が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。したがって、Yao Chen 氏提出の博士論文は、博士（理学）の学位論文として合格と認める。